

# 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수가 토양응력에 미치는 영향

## The Effect of Dynamic Load, Inflation Pressure and Multiple Passes of Tire on Soil Stress

박 원 엽\*  
정희원  
W. Y. Park

이 규 승\*  
정희원  
K. S. Lee

### 1. 서 론

토양다짐은 트랙터 등과 같은 농기계에 의해 주로 나타난다. 특히 현대에는 대형 농기계의 사용으로 인해 과도한 토양다짐을 초래하는 경우가 많다.

과도한 토양다짐은 토양밀도의 증가를 가져오고, 이에 따라 토양의 공극율이 작아져 토양중의 산소공급이 감소하게 된다. 또한, 물의 투과특성과 보수특성을 변화시켜 물이 토양 속으로 스며드는 것을 저지하게 되어 물은 토양 위로 흘러 토양의 침식을 증가시킨다. 또한 토양다짐은 토양저항력을 증가시켜 뿌리성장을 방해하고 이로 말미암아 작물 수확량의 감소를 초래한다(Gill and Vanden Berg, 1967). Raghavan(1979)은 기계류의 사용에 따른 토양다짐과 곡물의 생산량의 관계에 관한 연구에서 토양다짐은 곡물의 수확량을 30~50%까지 감소시킨다고 보고하였다.

토양다짐에 대한 연구는 미국과 유럽 등지에서 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 기계의 성능과 효율에 대한 연구에 비하여 매우 저조한 실정이다. 그러나 국내에서도 농기계의 사용이 증가하고, 또한 그 크기가 점차 대형화되고 있기 때문에 이에 따른 토양다짐의 특성에 관한 계속적인 연구가 필요하다.

토양다짐은 트랙터 등과 같은 대형 농기계의 주행장치 즉, 타이어에 작용하는 동하중(dynamic load)이 주요 원인이고, 또한 타이어의 공기압과 통과횟수 등도 토양다짐에 크게 영향을 미친다(Abebe, 1989). 토양다짐에 대한 연구는 타이어

아래에서 작용하는 토양 표면 및 토양속 응력상태를 정확하게 결정하는 것에서 비롯된다.(Reaves and Cooper, 1960 ; Onafenko and Reece, 1967). 그러므로 타이어와 토양의 접촉압력 및 타이어 아래 토양속의 응력 분포에 관한 연구는 토양다짐에 대한 연구에 있어서 선행되어야 한다.

따라서 본 연구는 타이어에 의해 발생하는 토양다짐 현상을 구명하기 위한 선행 연구로서 타이어의 동하중과 공기압 그리고 통과횟수의 변화에 따른 타이어 접지압 및 토양속 응력분포를 실험적으로 조사하기 위해 수행되었다.

### 2. 재료 및 방법

#### 가. 실험장치

##### 1. 실험토양

타이어-토양간의 상호작용을 분석하기 위한 실험은 신뢰성 있는 자료의 측정 및 수집을 위하여 인공토조(soil bin)에서 수행하였다. 인공토조내의 실험토양은 사양토(sandy loam)를 이용하였으며, 미농무성법(USDA)에 따라 실시한 실험토양의 조성 및 분류는 표 1과 같다.

##### 2. 인공토조시스템

인공토조시스템(soil bin system)은 토양조 및 레일시스템, 대차구동시스템, 작업대차 및 토양가

\* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스전공

공대차 등으로 구성되어 있다. 토양조는 길이 12m, 폭 1m, 높이 0.7m로서 필요에 따라 토양의 수분함량을 조절할 수 있도록 배수시설이 되어 있으며, 토양가공대차는 토양의 물리적 상태가 실험목적에 적합하도록 실험과 실험사이에 토양을 가공하는 대차로서 토양가공에 필요한 로타리 톨러, 표면다짐롤러, 균평기 등을 포함하고 있다. 한편, 작업대차는 타이어를 장착할 수 있는 차륜프레임이 부착되어 있으며 또한 자료의 측정 및 수집을 위한 자료 수집시스템이 구성되어 있다.

Table 1 Texture and composition of test soil by USDA classification

Composition			Texture
Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	
53.5	37.1	9.4	Sandy loam

### 3. 실험타이어

실험에 사용된 타이어는 국내 H사에서 생산되는 6.00 R14 LT인 타이어로서 이 타이어는 타이어의 외경과 단면폭이 각각 678mm, 150mm이고, 허용 최대 공기압과 최대하중은 각각 447.85 kPa (65psi)과 7.36 kN이다.

### 4. 타이어 접지압 및 토양속 응력 측정 장치

타이어가 진행할 때 나타나는 타이어 접지압은 타이어 중심부의 표면을 가공한 후 소형 압력센서를 부착하여 측정하였다. 사용된 압력센서는 KYOWA사에서 생산되는 PS-SF3형의 압력센서로서 최대 허용압력은 500kPa이다. 한편, 토양속 응력측정은 타이어접지압의 측정에 사용된 동일한 압력센서를 토양속 10cm 및 20cm 깊이에 위치시켜 측정하였다. 그림 1은 타이에 부착된 압력센서의 모습을 보여주고 있다.

### 5. 타이어 구동 시스템

실험 타이어는 측정대차의 차륜프레임에 장착되고, 타이어는 차륜프레임에 설치되어 있는 8ps의 유압모터에 의해 구동된다. 타이어가 장착된 차륜프레임은 웜기어와 미끄럼 베어링에 의해 좌·우 및 상·하 방향으로 자유롭게 이동할 수 있도록 구성되었다. 한편 유압모터로부터 발생

된 토크는 스프로킷과 체인 연결방식을 통해 타이어로 전달되도록 구성하여 기어비가 다른 스프로킷의 교환을 통해 타이어의 회전속도와 토크를 쉽게 변화시킬 수 있다. 또한 타이어 구동시스템에는 타이어의 구동축에 로타리엔코더를 설치하여 타이어의 속도를 측정할 수 있도록 구성하였다. 그림 2에 본 실험에서 사용한 타이어 구동시스템의 모습을 나타내었다.

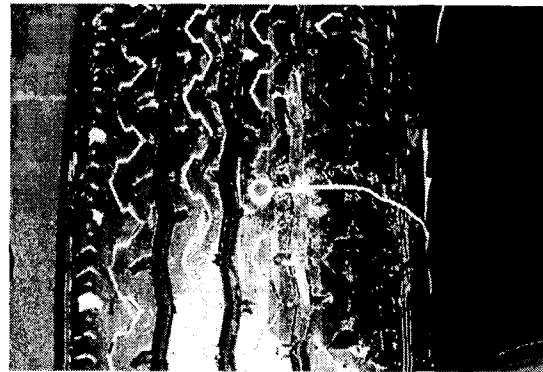


Fig. 1 View of pressure transducer for measuring contact pressure of tire.

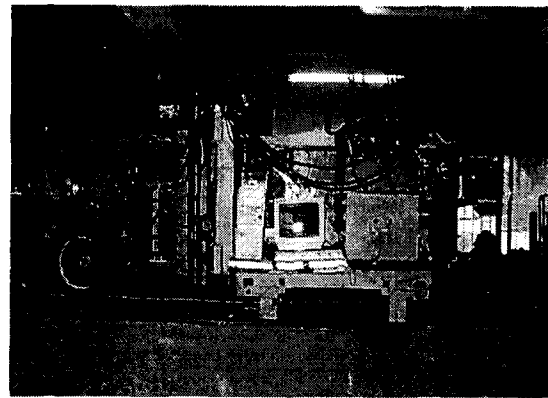


Fig. 2 Overall view of tire driving system.

## 나. 실험방법

### 1. 토양가공

실험토양은 매 실험마다 동일한 토양상태를 유지하기 위하여 인공토조시스템의 토양가공대차를 이용하여 매 실험 전에 20cm 깊이로 로타리작업 2회와 균평작업을 1회 실시하였다. 또한 작은 돌이나 흙덩어리가 압력센서에 미칠 수 있는 영

항을 최소화하기 위해 직경 2mm의 채를 이용하여 균일한 토양상태를 유지하도록 하였다. 표 2는 토양가공이 수행된 직후에 측정된 토양의 물리적 특성을 나타내고 있다.

Table 2 Soil properties of experimental soil

Cone Index (kPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (degree)	Moisture content (%)
421.8	3.05	24.4	12

### 2. 타이어 접지압 및 토양속 응력 측정 방법

타이어의 접지압은 타이어트래드의 중심부 표면을 가공하여 압력센서를 부착한 후 타이어가 진행할 때 타이어 표면에 부착된 압력센서가 토양표면과 접촉하는 구간에 걸쳐 타이어-토양 접지면에서의 토양반력을 측정함으로써 구하였다. 한편, 토양속 응력분포는 타이어접지압의 측정에 사용된 것과 동일한 압력센서를 토양표면으로부터 각각 10cm 및 20cm 깊이의 토양속에 묻은 후 타이어가 토양속 압력센서 위를 통과하는 동안에 토양속 10cm 및 20cm 깊이에 묻혀 있는 압력센서에 나타나는 응력값을 각각 측정함으로써 구하였다.

### 3. 실험인자

타이어의 동하중과 공기압, 그리고 타이어의 통과횟수가 타이어 접지압과 토양속 응력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수를 각각 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

Table 3 Conditions of experimental variables

Variables (unit)	Range
Dynamic load (kN)	1.17, 2.35, 3.53
Inflation pressure (kPa)	103.42, 206.84, 413.69
Number of passes	1, 2, 3, 4, 5

동하중은 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN의 세 수준으로 선정하였고, 공기압은 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa의 세 수준으로 선정하였다. 한편 타

이어의 통과횟수는 1, 2, 3, 4, 5회의 5수준으로 선정하였고, 모든 실험은 3회 반복하였다. 표 3에 본 실험에서 수행한 각 변수의 실험조건을 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 가. 타이어의 동하중과 공기압이 타이어의 접지압과 토양속 응력에 미치는 영향

그림 3은 타이어의 동하중과 공기압이 각각 3.53kN과 103.42kPa인 조건에서 타이어의 접지압 분포(토양표면)와 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포를 측정된 결과이다. 그림에서 x축상의 0(zero)은 타이어 중심축의 연직하방의 위치를 나타내고, 음수(-)와 양수(+)부분은 각각 타이어의 진입부(entry part)와 탈출부(exit part)의 연직하방에서 타이어 중심축까지의 수평거리를 나타낸다.

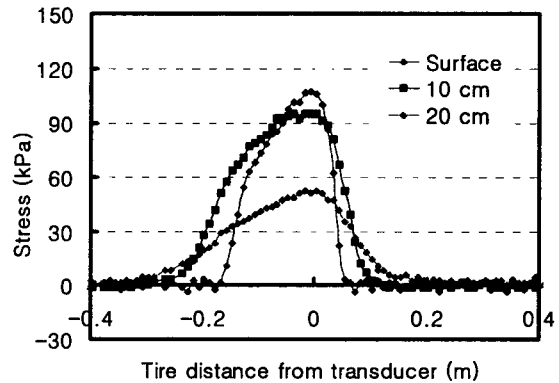


Fig.3 Soil stress distributions at three different depth of soil for the tire with the dynamic load of 3.53kN and the inflation pressure of 102.42kPa.

그림 3에서 볼 수 있듯이, 타이어가 진행할 때 타이어의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포는 타이어중심축의 휠전 방향에서부터 나타나 타이어의 중심축에 가까워질수록 응력값이 점점 증가하여 타이어의 중심축 아래에서 최대 응력값이 나타났고, 그 후 타이어의 중심축을 넘어선 탈출부에서의 응력값은 진입부에 비해서

급격히 0으로 감소하였다. 즉, 타이어접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포구간은 세 토양 깊이 모두 타이어 진입부에서의 응력분포구간이 탈출부의 경우보다 넓게 나타났다.

타이어의 접지압 및 토양 속 응력분포구간이 타이어 중심축을 기준으로 후방보다 전방에서 더욱 넓게 나타난 이유는 토양이 탄-소성 거동을 하기 때문으로 판단된다. 즉, 타이어가 주행할 때 타이어의 진입각(entry angle)은 탈출각(exit angle)보다 크기 때문에 타이어-토양간의 접지면에 있어서 타이어 중심축을 기준으로 전방에서의 접지길이가 후방에서의 접지길이보다 크게 되어 타이어의 중심축 전방에서의 응력분포구간이 후방에 비해 더욱 넓게 나타난 것으로 판단된다.

또한 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대응력값은 접지압의 경우가 가장 크고 토양속 10cm 및 20cm의 순으로 나타났다. 이러한 결과로부터 타이어의 토양다짐 효과는 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈수록 그 효과가 작은 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서는 타이어에 작용하는 동하중과 타이어의 공기압이 타이어접지압과 토양속 응력분포에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 그러나 앞의 그림 3에 나타난 바와 같이 타이어의 접지압분포와 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포는 x축상의 넓은 구간에 걸쳐 다르게 나타나기 때문에 타이어의 동하중과 공기압의 변화에 따른 접지압 및 토양속 응력값을 직접적으로 비교하기에는 적당치 못하였다. 따라서 동하중과 공기압의 변화에 따른 접지압 및 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력값의 비교는 응력이 나타나는 전체 구간내에서 최대값(maximum value)을 이용하였다.

그림 4는 206.84kPa의 일정 공기압 조건에서 타이어의 동하중을 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN으로 변화시켰을 때 타이어의 최대 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값을 측정 한 결과를 보여주고 있다.

그림 4에 나타난 바와 같이, 타이어의 동하중이 각각 1.17kN, 2.53kN, 3.53kN일 때 토양표면에서의 최대 타이어접지압은 각각 85.242kPa, 114.417kPa, 116.530kPa이고, 토양속 10cm의 경우에는 각각 54.416kPa, 83.557kPa, 97.214kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 27.670kPa,

51.250kPa, 56.095kPa로서 타이어의 동하중이 증가할수록 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대응력값은 증가하였다. 또한 토양 깊이에 따른 최대응력값은 토양표면에서 가장 크고 토양깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다.

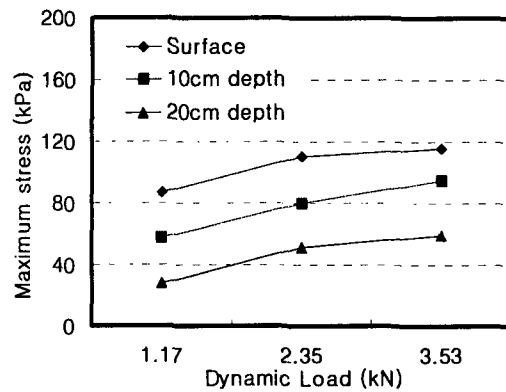


Fig. 4 Variations in maximum stress with dynamic load at three different depth of soil for the tire with the constant inflation pressure of 206.84 kPa.

한편, 타이어의 동하중을 1.17kN에서 2.35kN 및 3.53kN으로 각각 100% 및 200% 증가시켰을 때의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대응력값의 증가량은 접지압의 경우 각각 29.185kPa, 31.288kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 29.141kPa, 42.798kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 23.580kPa, 28.425kPa로 나타났다. 즉, 타이어의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값은 세 수준의 토양깊이에 대해 모두 타이어의 동하중이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났고, 동하중의 증가에 따른 최대 응력값의 증가량은 세 토양 깊이에 대해 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 응력값의 증가경향은 세 수준의 토양깊이에 대해 모두 동하중이 증가함에 따라 증가량이 감소하는 지수곡선의 형태로 나타났다.

위와 같이 타이어의 동하중이 증가함에 따라 타이어의 접지압과 토양속 최대 응력값의 증가량이 감소하는 이유는 동하중이 증가할 경우 타이어의 침하가 증가하게 되어 타이어-토양간의 접지면적이 넓어지기 때문으로 판단된다.

또한 동하중의 증가는 타이어의 변형 특히 타

이어의 트래드중심부의 변형을 유발하여 트래드 중심부의 형태가 곡선에서 평면에 가까운 형태로 변형되어 트래드의 중심부분에서 지지되던 하중의 일부가 트래드의 측면으로 이동하기 때문으로 판단된다.

그림 5는 2.35kN의 일정 동하중에서 타이어의 공기압이 각각 103.42kPa, 206.82kPa, 413.69kPa 일 때 측정한 타이어의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값을 나타내고 있다.

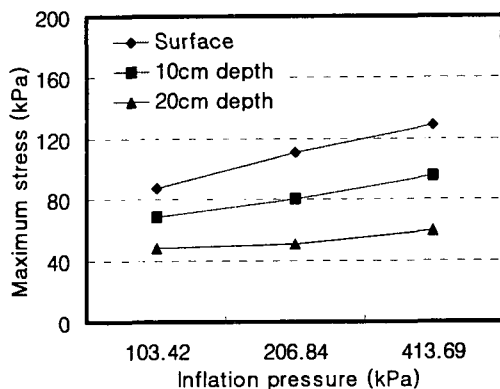


Fig. 5 Variations in maximum stress with inflation pressure at three different depth of soil for the tire with the constant dynamic load of 2.35 kN.

그림 5에서 타이어의 공기압이 각각 103.42 kPa, 206.84kPa, 413.69kPa일 때 토양표면에서의 최대 접지압은 각각 86.62kPa, 114.417kPa, 129.617kPa이고, 토양속 10cm의 경우에는 각각 68.766kPa, 83.557kPa, 95.88kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 48.218kPa, 51.270kPa, 59.815kPa로서 타이어의 공기압이 증가할수록 타이어의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값은 증가하였다. 또한 토양 깊이에 따른 최대 응력값은 토양표면에서 가장 크고 토양깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다.

한편, 타이어의 공기압이 103.42kPa에서 206.84kPa 및 413.69kPa으로 각각 100% 및 300% 증가되었을 때의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대응력값의 증가량은 접지압의 경우에는 각각 27.796kPa, 42.996kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 14.791kPa, 27.115kPa, 그

리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 3.052kPa, 11.597kPa로 나타났다.

그림 5의 결과로부터, 타이어공기압의 증가는 전술한 동하중의 결과(그림 4)와 마찬가지로 접지압 및 토양속 응력값을 증가시키는 것으로 나타났다으나 공기압의 증가에 따른 세 토양 깊이에서의 최대 응력값의 증가량은 접지압의 경우가 가장 크게 나타났고, 토양속으로 들어갈수록 증가량이 작게 나타났다. 즉, 공기압의 증가에 따른 토양 깊이별 다짐효과는 토양표면에서 가장 크고, 토양 깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다. 또한 공기압의 증가에 따른 접지압 및 토양속 응력의 증가경향은 동하중을 증가시켰을 때와는 달리 거의 선형적으로 나타났다.

#### 나. 타이어의 통과횟수가 타이어의 접지압 및 토양속 응력에 미치는 영향

그림 6은 타이어의 동하중과 공기압이 각각 1.17kN과 413.69kPa인 조건에서 타이어의 통과 횟수가 각각 1, 3, 5회일 때 측정한 타이어의 접지압분포를 나타내고 있고, 그림 7은 같은 조건에서 측정한 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력 분포를 나타내고 있다.

그림 6과 7에서 볼 수 있듯이, 통과횟수에 따른 타이어의 접지압분포와 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포는 모두 통과횟수가 많아짐에 따라 측정구간은 감소하였고, 최대 응력은 증가하는 것으로 나타났다.

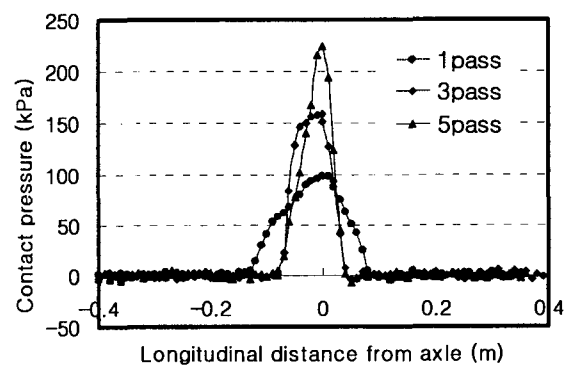


Fig. 6 Effect of number of passes on contact pressure for the tire with the dynamic load of 1.17kN and the inflation pressure of 413.69 kPa.

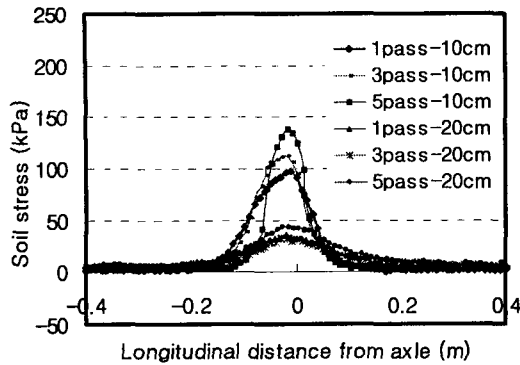


Fig. 7 Effect of number of passes on soil stresses for the tire with the dynamic load of 1.17 kN and the inflation pressure of 413.69 kPa.

이러한 결과는 타이어가 토양 위를 처음(1회) 통과할 때는 토양이 상대적으로 연약하여 타이어의 침하가 크게 되어 타이어-토양간의 접지구간이 넓게 나타나지만 통과횟수가 증가할수록 토양은 점점 다져져 타이어의 침하가 작아지게 되어 타이어-토양간의 접지면적이 감소하기 때문이다. 즉, 통과횟수의 증가에 따른 접지면적의 감소는 타이어접지압 및 토양속 응력측정 구간의 감소로 나타나고, 이러한 접지면적의 감소가 타이어의 접지압 및 토양속 응력값의 증가로 나타나게 된 것으로 판단된다.

그림 8은 타이어의 동하중과 공기압이 각각 3.35kN, 413.69kPa인 조건에서 통과횟수의 변화에 따른 타이어의 최대 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값을 측정한 결과이다.

그림 8에 나타난 바와 같이 1~5회까지 통과횟수에 증가에 따른 세 토양깊이에서의 최대 응력값은 접지압의 경우 각각 151.369kPa, 198.947kPa, 212.402kPa, 241.693kPa, 233.155kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 97.280kPa, 155.843kPa, 162.761kPa, 166.423kPa, 168.864kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 56.095 kPa, 79.346kPa, 84.228kPa, 82.228kPa, 84.229 kPa로서 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값은 세 경우 모두 통과횟수가 많아질수록 증가하는 것으로 나타났다.

또한 타이어의 1회 통과에 대한 2~5회 통과후의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대

응력값의 증가량은 접지압의 경우에는 각각 47.578kPa, 61.033kPa, 90.324kPa, 81.786kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 58.563kPa, 65.481kPa, 69.143kPa, 71.584kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 23.251kPa, 28.133kPa, 24.133kPa, 28.134kPa로서, 1회 통과에 대해 통과횟수의 증가에 따른 응력값의 증가 경향은 2회 통과했을 때의 증가량이 가장 크게 나타났고, 그 후 통과횟수가 증가할수록 증가량이 점점 감소하여 특정 통과횟수 이후에는 응력값의 증가가 거의 나타나지 않았다. 즉, 통과횟수의 증가에 따른 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력값은 세 경우 모두 지수곡선 형태로 증가하는 경향을 나타내었다.

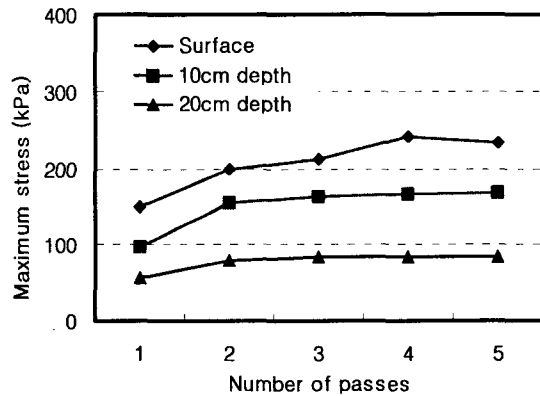


Fig. 8 Variations in maximum stress with number of passes at three different depth of soil for tire with the dynamic load of 3.35kN and the inflation pressure of 206.84 kPa.

한편, 통과횟수의 증가에 따른 토양 깊이별 최대응력값의 증가량은 접지압의 경우가 가장 크고 토양속 10cm 및 20cm의 순서로 나타났다. 즉, 통과횟수에 따른 토양 깊이별 최대 응력값의 증가량은 토양속으로 들어갈수록 작은 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터 타이어의 통과횟수의 증가는 토양다짐의 증가를 보이는 것으로 나타났고, 타이어의 1회 통과에 대해 통과횟수의 증가에 따른 토양의 추가적인 다짐효과는 통과횟수가 증가할수록 그 영향이 작아지는 것으로 나타났다. 또한 통과횟수의 증가에 따른 토양 깊이별 다짐

효과는 토양 표면에서 가장 크고 토양속으로 내려갈수록 감소하는 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 타이어가 토양다짐에 미치는 영향을 구명하기 위한 선행 연구로서 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화가 타이어접지압(토양 표면)과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 실험은 인공토조시스템에 구성된 단일 타이어 구동장치(single tire driving system)를 이용하여 인공토조내의 사양토에서 수행되었으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 세 경우 모두 토양표면에서의 타이어접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력값을 증가시켰다. 따라서 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 모두 토양다짐을 증가시키는 것으로 판단된다.
2. 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화에 따른 토양깊이별 응력값의 크기는 세 경우 모두 접지압, 토양속 10cm 및 20cm의 순서로서 토양속으로 들어갈수록 응력값이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 토양 깊이별 다짐효과는 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈수록 감소하는 것으로 판단된다.
3. 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가에 따른 세 수준의 토양 깊이별 응력값의 증가경향은 동하중과 통과횟수를 증가시켰을 경우에는 지수곡선의 증가경향을 나타내었으나 공기압을 증가시킨 경우에는 거의 선형적인 증가경향을 나타내었다.
4. 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가에 따른 응력값의 절대적인 증가량은 공기압을 증가시킨 경우가 동하중과 통과횟수를 증가시킨 경우에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 공기압의 증가는 동하중과 통과횟수를 증가시킨 경우에 비해 토양다짐효과가 작은 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

1. Abebe, A. T., T. Tanaka and M. Yamazaki. 1989. Soil Compaction by Multiple Passes of a Rigid Wheel Relevant for Optimization of Traffic. *Journal of Terramechanics* 26(2):139-148.
2. Bailey, A. C., R. L. Raper, T. R. Way, E. C. Burt and C. E. Johnson. 1996. Soil Stresses Under A Tractor tire at Various Load and Inflation Pressures. *Journal of Terramechanics* 33(1):1-11.
3. Gill, W. R. and G. E. Vanden Berg. 1967. Soil Dynamics in Tillage and traction. *Handbook* 316. Agr. Res. Service, U. S. Dept. Agriculture, Washington. D. C.
4. Onafenko, O. and A. R. Reece. 1967. Soil stresses and Deformations beneath Rigid Wheels. *Journal of Terramechanics* 4(1):59-80.
5. Raghavan, G. S., V. E. McKyes, F. Taylor, P. Richard and A. Watson. 1979. The Relationship between Machinery Traffic and Corn Yield Reductions in Successive years. *Transaction of the ASAE* 22(4):1256-1259.
6. Reaves, C. A. and A. W. Cooper. 1960. Stress Distribution in Soils Under Tractor Loads. *Journal of Agricultural Engineering Research* 41:20-21, 31
7. Way, T. R., C. E. Johnson, A. C. Bailey, R. L. Raper and E. C. Burt. 1996. Soil Stresses State orientation Beneath A Tire at Various Load and Inflation Pressures. *Journal of Terramechanics* 33(4):185-194.
8. Wong, J. Y. 1984. *Terramechanics and Off-road Vehicles*. Elsevier Publishers.